

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

---

**11/1/3**

**Одобрено кафедрой  
«Энергоснабжение  
электрических железных дорог»**

# **ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ**

**Рабочая программа  
и задание на контрольную работу № 1  
с методическими указаниями  
для студентов IV курса**

**специальности**

**190401 (101800) ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ  
(ЭНС)**



**Москва – 2006**

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки дипломированного специалиста по специальности 190401 «Электроснабжение железных дорог» (ЭНС) утвержденного Ученым советом РГОТУПС.

С о с т а в и т е л ь — канд. техн. наук, доц. А.А. Дерябин

Р е ц е н з е н т — канд. техн. наук, проф. Р.В. Шиловская

## 1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Предмет «Электронная техника и преобразователи в электроснабжении» является одним из базовых специальных курсов для инженеров путей сообщения — электромехаников. Целью изучения дисциплины является: знание современных схем энергетической электроники, принципов действия и возможностей электронных устройств; умение грамотно эксплуатировать эти устройства, квалифицированно проектировать и формулировать задания на их разработку.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучив дисциплину, студент должен:

2.1. *Знать* физические основы работы полупроводниковых приборов, принцип их действия, смысл предельных параметров и характеристик. Теорию физических явлений в преобразовательных агрегатах, расчетные соотношения, позволяющие по заданному режиму работы потребителя определять электрические параметры для выбора полупроводниковых приборов, трансформаторов, реакторов и других элементов. Основные методы анализа и расчета физических процессов в элементах преобразователей различной конфигурации.

2.2. *Уметь* правильно и грамотно эксплуатировать, испытывать и исследовать преобразовательную технику, применяемую на тяговых подстанциях. Проводить анализы и расчеты электрических параметров полупроводниковых элементов и самих преобразователей для решения широкого круга инженерных задач.

2.3. *Иметь* представление о конструкции, типах и способах изготовления полупроводниковых приборов, о перспективных направлениях развития преобразовательной техники в системах электрической тяги и в смежных областях техники, знать и уметь применять полученные знания на практике.

### 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Вид учебной работы	Всего часов
Количество часов по Госстандарту	150
Аудиторные занятия:	24
Лекции	4
Лабораторный практикум	20
Самостоятельная работа:	96
Контрольная работа	30
Вид итогового контроля	Зачет, экзамен

### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции, ч	Лабораторный практикум, ч
1	Физические основы полупроводниковой техники	0,4	
2	Полупроводниковые диоды	0,8	8
3	Тиристоры	0,2	
4	Транзисторы	0,3	
5	Другие полупроводниковые приборы, применяющиеся в устройствах электроснабжения	0,3	
6	Выпрямители	1	12
7	Зависимые инверторы	0,6	
8	Другие виды управляемых преобразователей	0,4	

#### 4.2. Содержание разделов дисциплины

##### Введение

Предмет «Электронная техника и преобразователи в электроснабжении». История развития преобразовательной техники и полупроводниковых приборов. Электроника и электроснабжение для тяги поездов. Направления и перспективы развития полупроводниковой техники и преобразователей на железнодорожном транспорте.

## РАЗДЕЛ 1. Полупроводниковые приборы

### *1.1. Физические основы полупроводниковой техники*

Основы зонной теории твердых тел. Строение атома. Распределение электронов по энергетическим уровням в твердом теле. Энергетические зоны и энергетические диаграммы для металлов, диэлектриков и полупроводников.

Понятие о проводимости полупроводниковых материалов, механизм электронной и дырочной проводимости. Собственная и примесная проводимость. Основные и неосновные носители зарядов. Кремниевые и германиевые полупроводники. Понятие об органических полупроводниках. Вырожденные и невырожденные полупроводники. Образование электронно-дырочного ( $p-n$ ) перехода, его технология изготовления. Пробой  $p-n$ -перехода. Особенности лавинного пробоя  $p-n$ -перехода. Вольт-амперная характеристика  $p-n$ -перехода, ее моделирование вольт-амперной характеристики. Моделирование полупроводниковых приборов.

### *1.2. Полупроводниковые диоды*

Классификация полупроводниковых диодов. Выпрямительные диоды, как элемент силовой электрической цепи и их основные параметры. Понятие о номинальных параметрах, энергетических, тепловых перегрузочных характеристиках диодов, обозначения их типов. Зависимость между параметрами диода, параметрами сети электроснабжения и конструкцией преобразователя. Методы и способы испытаний силовых диодов. Современные типы полупроводниковых диодов.

### *1.3. Тиристоры*

Общие сведения, назначение и классификация тиристоров. Физические основы процессов протекающих в диодных и триодных  $p-n-p-n$ -структурах. Вольт-амперные характеристики, характеристики запираения и характеристики цепи управления тиристоров. Типы, конструкция и условное обозначение различных типов тиристоров, запираемые тиристоры. Нормиро-

вание параметров тиристоров по напряжению, по току, по перегрузочной способности.

#### *1.4. Транзисторы*

Классификация транзисторов и их условные обозначения. Принцип действия биполярных и униполярных транзисторов. Физические процессы, режимы работы и схемы включения биполярных транзисторов. Электрические и эксплуатационные параметры биполярных транзисторов. Зависимость режима работы и параметров транзисторов. Работа транзистора в ключевом и активном режиме.

Виды и конструкции униполярных (полевых) транзисторов. Физические процессы, протекающие в полевых транзисторах и режимы их работы. Зависимость между режимами работы и характеристиками транзисторов. Область применения полевых транзисторов. Обозначения полевых транзисторов.

#### *1.5. Другие полупроводниковые приборы, применяющиеся в устройствах электроснабжения*

Стабилитроны, фото- и светодиоды, фоторезисторы, оптроны. Туннельные диоды. Термисторы, варисторы, магниторезисторы, варикапы. Другие типы приборов. Современные типы транзисторных устройств и интеллектуальных транзисторных модулей, силовые транзисторы, ультрабыстрые диоды диодные мосты и сборки.

## **РАЗДЕЛ 2. Преобразователи параметров электрической энергии**

### *2.1. Введение*

Типы, классификация и назначение различных видов преобразователей параметров электрической энергии. Применение преобразователей параметров электрической энергии в системах электроснабжения. Проектирование преобразователей, сущность и этапы проектирования.

Аналитические и численно аналитические методы расчета преобразователей. Моделирование преобразователей, ком-

понентов и цепей. Обоснование и выбор типа полупроводниковых приборов. Расчет групповых соединений электронных приборов. Требования, предъявляемые к преобразователям параметров электрической энергии.

Надежность, технологичность и компоновка полупроводниковых преобразователей. Принципы конструирования электронных преобразователей.

## *2.2. Выпрямители*

Назначение и классификация выпрямителей. Структурная схема выпрямителя. Инженерный расчет выпрямителя, параметры необходимые для расчета и требования, предъявляемые к выпрямителям. Выпрямление однофазного тока. Выпрямление трехфазного тока. Одно-, двух-, трех-, шести- и много-пульсовые схемы выпрямления. Внешние характеристики и энергетические показатели различных схем выпрямления.

Коммутация в выпрямительных установках и пульсация напряжения. Влияние коммутации на работу выпрямителя. Внешняя характеристика выпрямителя.

Назначение и классификация управляемых выпрямителей. Способы регулирования выпрямленного напряжения. Управляемые выпрямители с фазовым регулированием и импульсные выпрямители.

Гармонический состав, электрические и энергетические характеристики различных выпрямительных установок.

Классификация аварийных режимов работы выпрямителей. Внутренние и внешние аварии. Аварийные режимы в управляемых и неуправляемых выпрямителях. Виды и принципы функционирования защит выпрямителей от аварий.

Основные типы и схемы выпрямительных установок применяемых для электрифицированного железнодорожного транспорта. Их условные обозначения и основные технические характеристики.

## *2.3. Зависимые инверторы*

Инвертирование электрической энергии. Назначение и классификация инверторов. Одно- и трехфазные инверторы.

Коммутация в инверторах и ее влияние на формы кривых напряжений и токов. Влияние коммутации на управление инвертором. Внешняя, регулировочная и ограничительная характеристики инверторов. Соотношения между углами регулирования, коммутации и запаса, их влияние на устойчивую работу в зависимых инверторах. Энергетические показатели работы инвертора.

Виды аварийных режимов в работе инверторов. Опрокидывание инвертора и условие самоликвидации опрокидывания. Автоматическое регулирование угла опережения.

Инверторные агрегаты, применяемые в тяговом электро-снабжении железных дорог.

#### *2.4. Другие виды управляемых преобразователей*

Назначение и классификация автономных инверторов. Инверторы на полностью управляемых электронных приборах и на однооперационных тиристорах. Автономные инверторы напряжения. Одно- и трехфазные инверторы напряжения, их различные режимы работы. Электрические и энергетические показатели работы автономных инверторов.

Автономные инверторы тока. Одно- и трехфазные автономные инверторы тока. Регулирование частоты с помощью автономных инверторов. Существующие схемы автономных инверторов.

Применение импульсных преобразователей на электро-подвижном составе (ЭПС), влияние импульсного ЭПС на тяговую сеть. Преимущества и недостатки импульсного регулирования по сравнению с реостатным регулированием на ЭПС.

### **4.3. Лабораторный практикум**

№ п/п	Наименование лабораторных работ
1	Исследование свойств полупроводниковых вентилях и их вольт-амперных характеристик
2	Исследование схемы выпрямления с нулевой точкой трансформатора
3	Исследование мостовой схемы выпрямления



#### **4.4. Практические занятия**

Не предусмотрено.

### **5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

1. Контрольная работа — две (2 задачи).
2. Курсовая работа — не предусмотрена.
3. Курсовой проект — не предусмотрен.

## **6. УЧЕБНОМЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1. Рекомендуемая литература**

1. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 1999. — 464 с.

2. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. — М.: Высшая школа, 1984. — 424 с.

3. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. — М.: Высшая школа, 1982. — 496 с.

4. Засорин С.Н., Мицкевич В.А., Кучма К.Г. Электронная и преобразовательная техника. — М.: Транспорт, 1981. — 319 с.

5. Куликов П.Б. Неуправляемые двухпульсовые выпрямители электрических железных дорог: Уч. пос. — М.: ВЗИИТ, 1995. — 36 с.

6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1978.

### **6.2. Средства обеспечения освоения дисциплины**

Компьютерные программы в системе Mathcad

## **7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Компьютерный класс с программной средой Electronics Workbench.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

Цель контрольной работы — развитие навыков теоретического исследования и расчета электрических цепей, содержащих вентили и усилительные элементы.

Теоретический материал, который должен быть изучен перед выполнением контрольной работы, излагается в [1–3]. Можно пользоваться другими пособиями, рекомендованными программой курса «Электронная техника и преобразователи в электроснабжении». Многие расчеты требуют лишь применения общих методов, известных из курса ТОЭ или базирующихся на приемах математического анализа. Для решения задачи 1 целесообразно использовать литературу [2–5], а для задачи 2 — [1–3; 7; 8].

Выбор варианта для решения задач производится студентом в зависимости от цифр учебного шифра, стоящих после обозначения специальности (ЭНС).

Работы, выполненные не по своему варианту не проверяются и не зачитываются.

### ЗАДАЧА 1

#### Расчет однокаскадного ключевого усилителя на транзисторе<sup>1</sup>

1. Составить схему однокаскадного ключевого усилителя на транзисторе типа *p-n-p*.

Усилитель соединяется с источником входных импульсов посредством резистора.

2. Заданы: напряжение питания коллекторных цепей  $U_K$ , напряжение источника положительного смещения  $U_{см}$ , величина сопротивления нагрузки каскада  $R_K$ , предельная частота следования импульсов  $f_{ип}$  и наибольшая температура окружающей среды  $T_{max}$ .

Требуется выбрать тип транзистора и номинальные величины резисторов в схеме, обеспечивающих ключевой режим усилителя при потенциалах входа  $\Phi_B$  и  $\Phi_H$ .

---

<sup>1</sup> Результаты решения этой задачи используются в лабораторной работе

Предполагается, что импульс на вход усилителя подается от аналогичных транзисторных схем, причем по модулю нижний  $\varphi_{\text{н}}$  (отрицательный) потенциал входа относительно зажима  $+U_{\text{к}}$  составляет  $\varphi_{\text{н}} = a \cdot U_{\text{к}}$ , а верхний  $\varphi_{\text{в}} = -|U_{\text{кэ0}} + U_{\text{п0}}|$ , где  $U_{\text{кэ0}}$  — напряжение коллектор — эмиттер открытого выходного транзистора каскада, предыдущего по отношению к рассматриваемому усилителю;  $U_{\text{п0}}$  — напряжение помехи.

3. Найти значения потенциала входа  $\varphi'_{\text{вх}}$  и  $\varphi''_{\text{вх}}$ , при которых еще обеспечивается ключевой режим каскада в случае плавного изменения сигнала  $\varphi_{\text{вх}} = f(t)$  между  $\varphi_{\text{в}}$  и  $\varphi_{\text{н}}$  (рис. 1).

4. По диаграмме рис. 1, найденным  $\varphi'_{\text{вх}}$  и  $\varphi''_{\text{вх}}$  построить диаграмму изменения потенциала коллектора  $\varphi_{\text{к}} = f(t)$  транзистора  $VT$  каскада.

Исходные данные выбираются из табл. 1 и табл. 2 цифрам учебного шифра.

Таблица 1

Исходные данные		Вариант (предпоследняя цифра учебного шифра)									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Параметры входного сигнала	$U_{\text{п0}}$ , В	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6
	$a$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
$f_{\text{пр}}$ , кГц		50	250	120	10	5	30	100	60	150	200
$T_{\text{max}}$ , С		40	40	45	45	50	60	60	55	55	50

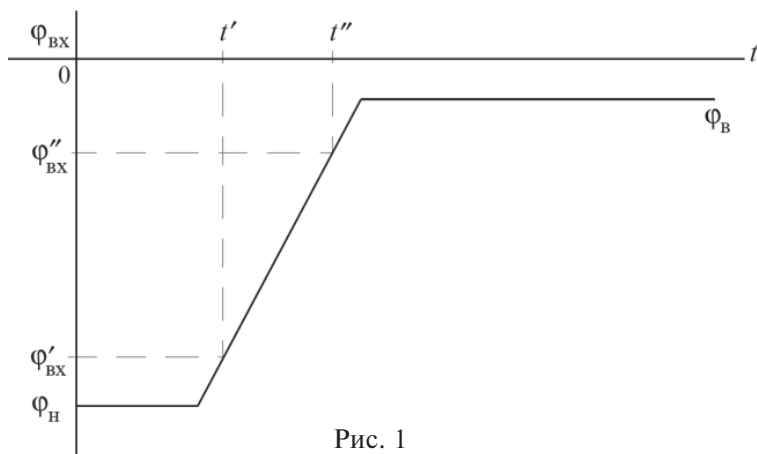


Рис. 1

Таблица 2

Исходные данные	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{кв}$ , В	-6	-8	-10	-12	-16	-20	-24	-30	-36	-40
$U_{см}$ , В	6	6	6	8	8	8	12	12	12	24
$R_{кв}$ , Ом	39	100	200	51	91	150	82	160	220	300

## ЗАДАЧА 2

### Расчет выпрямителя с идеальным трансформатором

Заданы напряжение сети  $U_c$ , средние значения выпрямленного напряжения  $U_d$  и тока  $I_d$  активной нагрузки, число пульсаций выпрямленного напряжения за период.

1. Составить схему выпрямления.
2. Рассчитать основные параметры трансформатора при питании активной нагрузки непосредственно от выпрямителя (вариант «а»).
3. Рассчитать индуктивность сглаживающего реактора, обеспечивающего заданное отношение  $k_n$  действующего значения пульсации тока к  $I_d$  (вариант «б»).
4. Для обоих вариантов построить временные диаграммы выпрямленного напряжения и тока, ЭДС и тока вторичной (вентильной) обмотки трансформатора, напряжения на одном из вентилях и тока вентиля.
5. При выполнении расчетов и построении диаграмм трансформатор и вентили считать идеальными, а активным сопротивлением обмотки сглаживающего реактора можно пренебречь. Исходные данные выбрать из табл. 3 и 4 по соответствующим цифрам учебного шифра.

Таблица 3

Исходные данные	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Выпрямленное напряжение $U_d$ , В	50	100	200	300	400	500	600	700	800	1000
Выпрямленный ток $I_d$ , А	1500	1200	1000	800	600	500	400	300	200	100

Таблица 4

Исходные данные	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кратность пульсаций $p$	2					6			3	
Напряжение сети $U_c$ , В	127	220	380	6000	10000	127	220	380	6000	10000
$k_n$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 1

Тексту решения должны предшествовать исходные данные и условия задачи.

Решение задач должно сопровождаться краткими пояснениями. При пользовании готовыми формулами необходимо указывать источник, из которого эти данные заимствуются. При расчетах вначале записывается формула в общем виде (с буквенными обозначениями), затем подставляется числовое значение каждой величины в том же порядке и в той же форме записи, как и в общей формуле, и только после этого можно приводить готовый результат вычислений. В пояснениях необходимо дать определение каждому буквенному обозначению. В некоторых случаях целесообразно привести промежуточные числовые значения отдельных членов или многочленов, входящих в формулу. Если в выражения входят элементарные функции, необходимо сначала определить численное значение аргумента и привести его, а затем дать значение функции. Следует также помнить, что при упрощении уравнений необходимо каждый раз заново переписывать правую и левую части; ставить несколько знаков равенства в уравнениях нельзя.

Все расчеты необходимо проводить с точностью до 3–4 значащих цифр. В задачах с применением графо-аналитических методов расчета масштаб чертежей должен выбираться достаточно крупным, а линии должны быть четкими, чтобы обеспечить удобное считывание величин с точностью 1–2 %.

Если у студента имеется возможность, для громоздких расчетов целесообразно использовать ЭВМ.

Условные обозначения на схемах должны соответствовать ГОСТу.

### Задача 1

Построение принципиальной схемы усилителя необходимо начать с изучения существующих схем. Теория работы транзистора в ключевом режиме изложена в [2, § 3.2; 3, § 111.5].

После составления принципиальной схемы следует приступить к расчету и выбору элементов, причем сначала выбирается транзистор каскада, а затем рассчитываются элементы его входной цепи. Параметры некоторых транзисторов даны в приложении. Более подробная информация о транзисторах дана в [4; 5].

Величина резисторов связи и смещения рассчитывается из следующих соображений. В открытом состоянии транзистора  $VT$  необходимо обеспечить базовый ток, достаточный для его надежного насыщения. Коэффициент насыщения при этом должен быть 1,5–2, а потенциал входа  $\varphi_n$ . Тогда расчетная схема входной цепи примет вид рис. 2, а, для которой можно составить (по законам Ома и Кирхгофа) уравнение, связывающее известные или выбранные значения  $U_{см}$ ,  $\varphi_n$ , и  $\varphi'_6$  и  $I_6$  с искомыми  $R_{см}$  и  $R_c$ .

В закрытом состоянии  $VT$  расчетная схема примет вид рис. 2, б, причем потенциал  $\varphi''_6$  выбирается на небольшом положительном уровне (0,2–1 В), чтобы обеспечить надежное запирающее  $VT$ .

Необходимый в расчетах нулевой коллекторный ток при заданной максимальной температуре окружающей среды можно определить по формуле

$$I_{k0\max} = I_{k0} \cdot \exp[(T_{\max} - T_c) \cdot a],$$

где  $a$  — 0,038  $\Sigma$  0,09 для германиевых и  $a = 0,12$  для кремниевых транзисторов;

$T_c$  — температура окружающей среды, для которой дано значение  $I_{k0}$  в справочнике (обычно 20  $\Sigma$  25°C).

По рис. 2, б составляется аналогичное уравнение, в котором  $R_{cm}$  и  $R_c$  неизвестны. Совместное решение уравнений, полученных по рис. 2, а и б, даст искомые значения резисторов.

Полученное на каждом этапе расчета значение сопротивления должно округляться до значения, предусмотренного стандартной шкалой номиналов резисторов, и в последующих расчетах нужно использовать выбранный номинал.

а)

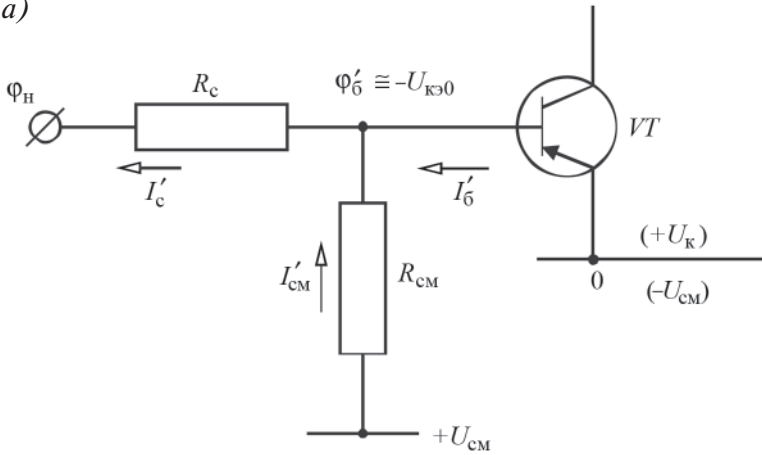


Рис. 2, а

б)

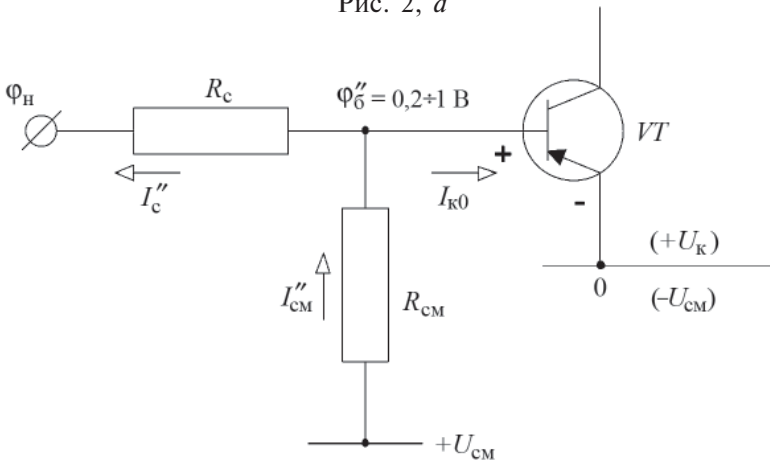


Рис. 2, б

## Шкала номинальных значений резисторов

$$\left. \begin{array}{cccccccccccc} 10 & 11 & 12 & 13 & 15 & 16 & 18 & 20 & 22 & 24 & 27 & 30 \\ 33 & 36 & 39 & 43 & 47 & 51 & 56 & 62 & 68 & 75 & 82 & 91 \end{array} \right\} \times 10^n, [\text{Ом}],$$

где  $n = 0, 1, 2 \dots$

После выбора всех номиналов резисторов можно приступить к решению п. 3 задания. Для этого надо составить две расчетные схемы наподобие рис. 2, а и б.

Значение  $\varphi'_{\text{вх}}$  соответствует моменту, когда транзистор  $VT$  еще находится в режиме насыщения, т.е. ток его базы минимальный, необходимый для насыщения (а не в 1,5–2 раза больший, принятый для надежной работы ключа).  $\varphi'_6$  в этот момент равен падению напряжения в открытом эмиттерном переходе  $VT$ .

Значение  $\varphi''_{\text{вх}}$  соответствует моменту транзистора закрытия  $VT$ , т.е.  $I'_6 = 0$ ,  $\varphi''_6 = 0$ . Дальнейшее повышение значения  $\varphi_{\text{вх}}$  до  $\varphi_{\text{в}}$  лишь повысит надежность запираания  $VT$ .

После вычисления значения  $\varphi'_{\text{вх}}$  и  $\varphi''_{\text{вх}}$  построение диаграммы  $\varphi_{\text{к}} = f(t)$  не представляет сложности: при  $t < t'$  транзистор находится в режиме насыщения,  $\varphi_{\text{к}}$  определяется падением напряжения эмиттер — коллектор  $VT$ ; при  $t' < t < t''$  транзистор работает в усилительном режиме, т.е.  $\varphi_{\text{к}}$  изменяется пропорционально  $\varphi_{\text{вх}}$ ; при  $t > t''$  транзистор  $VT$  заперт. Определяя  $\varphi_{\text{к}}$  в запертом состоянии, можно пренебречь нулевым коллекторным током транзистора.

Диаграммы входного сигнала, напряжения на выходе каскада следует строить одну под другой, в одном масштабе времени, обозначив и указав масштабы напряжений.

### Задача 2

Прежде всего необходимо выбрать схему выпрямления. Для этого следует ознакомиться с существующими схемами выпрямления однофазного или трехфазного тока, обеспечивающими заданную кратность пульсаций  $p$ , и изучить их сравни-



тельные технико-экономические характеристики. Полное технико-экономическое сравнение схем выпрямления требует учета стоимости вентилях, потерь энергии в питающей сети и самом выпрямителе, влияние различного качества выпрямленного напряжения на работу потребителя и т.д. в данном случае достаточно учесть хотя бы стоимость трансформатора, считая ее пропорциональной типовой мощности.

Затем следует выполнить расчет выпрямителя в предположении, что нагрузка — чисто активная (вариант «а»): рассчитать действующие значения токов и напряжений в трансформаторе, определить его типовую мощность.

Соотношения между заданными средними значениями  $U_d$ ,  $I_d$  и действующими значениями тока и напряжения в трансформаторе получают на основе исследования диаграмм этих величин. Выпрямленное напряжение за период  $2p$  может быть представлено, как  $p$  примыкающих друг к другу отрезков косинусоид  $U_d = U_{dm} \cdot \cos v$ , где  $U_{dm}$  — амплитуда выпрямленного напряжения,  $v = \omega t$  — фазовый угол. Таким образом, среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{p}{2\pi} \int_{-\pi/p}^{+\pi/p} U_{dm} \cos v dv. \quad (1)$$

Для однофазных и нулевых многофазных схем  $U_{dm} = E_{2m} = \sqrt{2} E_2$ , где  $E_2$  — действующее значение синусоидальной фазной ЭДС вторичной обмотки; для трехфазной мостовой схемы  $U_{dm} = \sqrt{3} E_2$ ,  $E_{2m} = \sqrt{6} E_2$ ; для схемы с уравнивающим реактором  $U_{dm} = E_{2m} \cdot \cos(\pi/6) = (\sqrt{6}/2) \cdot E_2$ .

При активной нагрузке форма тока повторяет форму напряжения, поэтому соотношение между амплитудным значением  $I_{dm}$  и средним  $I_d$  можно найти по формуле, аналогичной (1). Амплитуда тока фазы вторичной обмотки  $I_{2m} = I_{dm}$  для всех схем, кроме схемы с уравнивающим реактором, у которой  $I_{2m} = 0,5 \cdot I_{dm}$ . Зная общую длительность протекания тока по фазе  $\lambda$ ,

согласно определению действующего значения тока [1] получим:

$$I_2 = \sqrt{\frac{p \cdot \lambda}{4 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\pi/p}^{+\pi/p} I_{dm}^2 \cdot \cos^2 v dv}. \quad (2)$$

Токи и напряжения первичных обмоток находятся аналогично с учетом коэффициента трансформации  $n_m = \frac{U_{1\phi}}{E_2}$ .

В табл. 5 приведены соотношения, полученные по (1) и (2) для разных схем. Типовая мощность  $S_T$ , по определению [2; 3]:

$$S_T = \frac{m_1 U_{1\phi} I_1 + m_2 E_2 I_2}{2},$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — число фаз первичной и вторичной обмоток соответственно.

Таблица 5

Схема выпрямления	$\frac{E_2}{U_d}$	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{I_1 n_T}{I_d}$	$\frac{S_T}{U_d I_d}$	$\frac{U_{dn}}{U_d}, \%$
Однофазная двухполупериодная (двухпульсовая) с нулевым выводом	1,11	0,787	1,11	1,48	41,14
Однофазная (двухпульсовая) мостовая	1,11	1,11	1,11	1,23	41,14
Трехфазная с нулевым выводом (трехпульсовая)	0,855	0,583	0,476	1,35	17,68
Трехфазная мостовая - Ларионова (шестипульсовая)	0,427	0,817	0,817	1,045	4,04
Две обратные звезды с разделяющим (уравнительным) реактором (шестипульсовая)	0,855	0,29	0,408	1,26	4,04

После определения численного значения напряжения (ЭДС) вентильной (вторичной) обмотки трансформатора следует построить диаграммы синусоидальных фазных ЭДС этой обмотки, и на их основе найти кривые изменения мгновенных значений выпрямленного напряжения и напряжения на одном из вентилей выпрямителя. Кривая выпрямленного тока строится по кривой выпрямленного напряжения с учетом того, что нагрузка чисто активная. По кривой выпрямленного тока строятся кривые токов фазы вентильной и сетевой обмоток. На диаграммах следует нанести горизонталы, соответствующие  $U_d$  и  $I_d$ , которые должны представлять средние значения кривых  $u_d = f(t)$  и  $i_d = f(t)$ . Во избежание больших искажений результатов необходимо исходные ЭДС на диаграммах строить тщательно, по синусоидальному закону.

Расчет варианта «б», т.е. при питании нагрузки через сглаживающий реактор, следует начать с определения индуктивности его, необходимой для сглаживания тока до заданной степени.

Для определения величины индуктивности нужно вывести соотношение между действующим значением переменной составляющей тока нагрузки и индуктивностью реактора, включенного последовательно с активным сопротивлением заданной величины.

Расчетная схема для этого случая представлена на рис. 3.

Здесь  $R_a$  — активное сопротивление нагрузки, которое легко найти по заданным  $U_d$ ,  $I_d$ ,  $L_d$  — искомая индуктивность реактора;  $u_d$  — подводимое к нагрузке пульсирующее напряжение;  $i_d$  — ток в цепи.

Проще всего решить эту задачу, применив разложение кривой выпрямленного напряжения в ряд Фурье [8]. В данной задаче нет смысла учитывать гармоники высших порядков. Можно считать, что индуктивность сглаживающего реактора является достаточно большой и кроме постоянного тока и небольшой составляющей первой гармоники влияние остальных гармоник слабо ощущается. Кроме того существенное влияние на величину гармоник высоких порядков оказывает

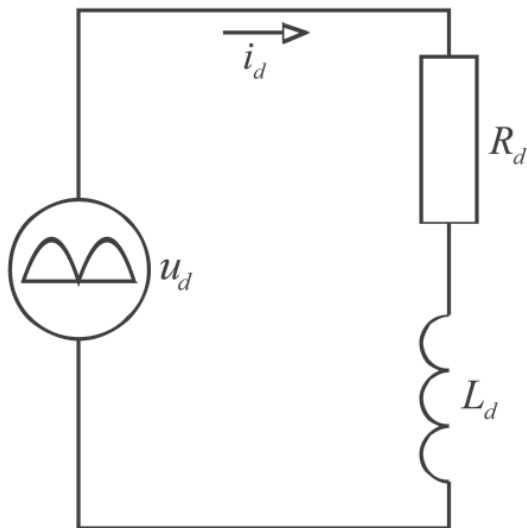


Рис. 3

фильтр — устройство тяговой подстанции. Следует иметь в виду, что нет смысла учитывать гармоники, доля которых в действующем значении тока ниже принятой точности расчетов (2–3%), т.е. при расчете следует ограничиться основной гармоникой.

Например, для однопульсовой схемы выпрямления переменная составляющая выпрямленного тока будет чистой синусоидой, и частота ее будет равна частоте питающей сети.

Таким образом задача сводится к расчету методом наложения схемы, представленной на рис. 3, в которой действуют два источника. Один источник постоянной ЭДС, а другой источник переменной ЭДС с напряжением  $U_{d(n)}$ . Частота источника переменной ЭДС больше в  $p$  — раз частоты питающей сети. Получив действующее значение переменного тока  $I$  в цепи, достаточно приравнять его к заданному  $I = k_n \cdot I_d$ , чтобы из полученного выражения найти неизвестную величину  $L_d$ .

При построении диаграмм для варианта «б» следует в одних осях с  $u_d$  построить синусоиду основной гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения. По найден-

ным  $R_d$  и  $L_d$  определяется амплитуда и фазовый угол основной гармоники выпрямленного тока, что позволяет построить диаграмму  $I_d = f(\theta)$ .

Диаграммы токов вентиля и обмотки трансформатора являются выкопировками из кривой  $i_d$  с учетом длительности и направления протекания  $i_d$  по ним.

Все диаграммы должны строиться с соблюдением выбранных масштабов угла, напряжения и тока. Масштабы напряжения (тока) всех диаграмм, иллюстрирующих работу вторичной обмотки и цепей выпрямителя должны быть одинаковы.

Вариант «б» можно также решить с помощью дифференциального уравнения, описывающего схему рис. 3.

Основные соотношения в выпрямителях работающих на активную нагрузку.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### Основная

1. Куликов П.Б. Неуправляемые двухпульсовые выпрямители электрических железных дорог: Уч. пос. — М.: ВЗИ-ИТ, 1995.

2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. — М.: Высшая школа, 1982.

3. Засорин С.Н. и др. Электронная и преобразовательная техника. — М.: Транспорт, 1981.

### Дополнительная

4. Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности: Справочник / А.А. Зайцев, А.И. Миркин, В.В. Мокряков и др.; Под ред. А.В. Гололедова. — 2-е изд. — М.: Радио и связь, КУБК-а, 1994.

5. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: Справочник / А.А. Зайцев, А.И. Миркин, В.В. Мокряков и др.; Под ред. А.В. Гололедова. — 2-е изд. — М.: Радио и связь, КУБК-а, 1994.

6. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке БЕЙСИК для персональных ЭВМ. — М.: Наука, 1987.

7. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.М. Основы преобразовательной техники. — М.: Высшая школа, 1981.

8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1978.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ  
В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

Рабочая программа  
и задание на контрольную работу № 1  
с методическими указаниями

Редактор *Г.В. Тимченко*  
Компьютерная верстка *Е.Ю. Русалева*

---

Тип. зак.	Изд. зак. 369	Тираж 500 экз.
Подписано в печать 19.01.06	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 1,5		Формат 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПСа,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПСа,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2